

# コンクリート床版のひび割れを考慮した連続合成桁の設計法

三木 孝則\*      谷口 望\*\*  
 中原 正人\*\*\*    池田 学\*

## The Design Method of the Continuous Composite Girders that Takes into Consideration Crack Formation of Concrete Slab

Takanori MIKI      Nozomu TANIGUCHI  
 Masato NAKAHARA    Manabu IKEDA

The continuous composite girders have been frequently used for railway bridges. The examination of the design technique has not been carried out so much, and this technique has not been unified standardized yet. In this study, when the tension stiffening analysis is used for the design calculation of continuous composite girders, the design technique is compared with the technique which does not use this analysis. Two types of girder having different span constitution are used as models for design calculation. The validity of application of the tension stiffening analysis to design of steel girder and concrete slab has been confirmed by the design calculation.

キーワード：連続合成桁，ひび割れ，テンションスティフニング，設計法

### 1. はじめに

合成桁は、引張に強い鋼桁と圧縮に強いコンクリート床版を合成させた合理的な構造で、鉄道橋に数多く適用されている。従来は単純桁形式の合成桁が主流であったが、最近では、複数の径間を連続化した連続合成桁の適用実績が増えている。

連続合成桁が適用される理由として、単純桁を複数連並べるより桁高を低減でき、さらに地震時の落橋の可能性が少なくなること等の利点が挙げられる。

一方、連続合成桁の中間支点付近は、コンクリート床版に引張力が生じひび割れが発生する可能性があり、これに対する照査が非常に重要となる。しかしながら、引張力を受けるコンクリート床版の設計上の取り扱いについては種々の方法があり、連続合成桁の照査法は未だ確立されていない。

連続合成桁の中間支点上のコンクリート床版のひび割れを考慮した設計法として、テンションスティフニング理論を用いたひび割れ制御設計法が提案されている<sup>1)~3)</sup>。著者らは、この設計法の鉄道の連続合成桁への適用を目的に、これまで模型試験体による載荷実験<sup>1)</sup>や実橋測定<sup>4)</sup>を行い、実挙動としての確認を行ってきた。そこで、本研究では、このコンクリート床版のひび割れを考

慮した設計法について実橋の設計への適用性を検討するため、3径間連続合成桁を対象に、種々の手法を用いて試設計を行った<sup>5)</sup>。そして、各手法の照査結果の相違を比較分析し、テンションスティフニング効果を考慮した設計法の連続合成桁への適用性について検討を行い、新設計標準での設計法を提案した。

### 2. 試設計に用いる構造物の概要と設計条件

対象橋梁は、3径間連続合成桁（複線並列2主桁、直橋）とし、支間60m程度を基本として支間割が異なる以下の2橋を設定した。

① A-model : 60 + 60 + 60 (m)

② B-model : 30 + 60 + 30 (m)

A-modelでは均等な支間割りでの一般的な橋梁を想定しており、B-modelでは、中間支間と端支間の比が1:0.5という支間が極端に異なった橋梁を想定している。これは、連続合成桁の中間支点部の挙動は支間割によって変わるため、その傾向を把握するために設定したものである。なお、B-modelの支間割りは、検討のため敢えて設定したものである。支間割りが極端な場合には、桁高を変化させた構造を採用するのが構造的に合理的となるが、本検討では、照査法の違いによる結果の相対的な比較を行うことが主目的であるため、桁高は一定とした。

図1にA-modelの標準断面図を示す。また、表1に、A-modelの端支間中央、中間支点上および中間支間中央断面における断面二次モーメントを示す。これらの断面以

\* 構造物技術研究部（鋼・複合構造）

\*\* 京都大学大学院（工学研究科）

\*\*\* 構造物技術研究部（鋼・複合構造）（現 中央復建コンサルタンツ(株)）

特集：鋼・合成構造物の設計技術

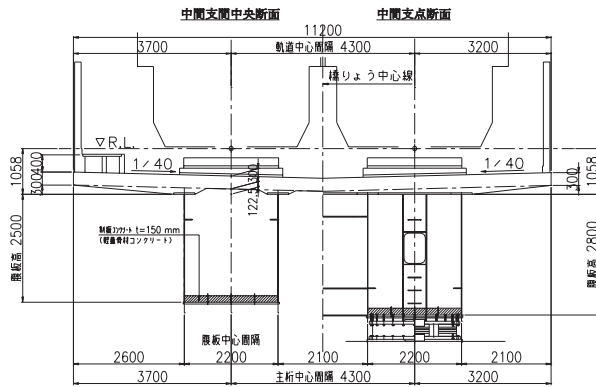


図1 標準断面図 (A-model の場合)

表1 断面二次モーメント (A-model, 単位: m<sup>4</sup>)

		断面		
		端支間部	中間支点部	中間支間部
合成断面	鋼桁断面: Is	0.206	0.441	0.093
	鋼と鉄筋: Is'	—	0.540	—
	鋼とコンクリート: Iv	0.510	0.902	0.334

外の詳細な検討を省略している。

列車荷重は新幹線荷重 (終局時: H-22, 使用・疲労時: H-17) とし, 設計速度は260km/hとした。

### 3. 連続合成桁の負曲げ部に対する設計の考え方と設計法

#### 3.1 連続合成桁の設計概要

連続合成桁の設計フローを図2に示す。仮定した断面の剛性を用いて構造解析を行い, 曲げモーメント等の断面力を算定し, 各断面における鋼桁やコンクリート床版の応力度等に対して照査を行うのが一般的な流れである。ここで, 連続合成桁の負曲げモーメントを受ける区間の断面の照査は, コンクリート床版のひび割れ幅や鉄筋の応力度に対して行う。

図3に構造解析により算定される曲げモーメント分布の概念図を示す。負曲げ区間の引張側コンクリートを考慮すると負曲げモーメントが大きく算定され, 逆に引張側コンクリートを無視すると負曲げモーメントは小さく算定される。また, 断面照査においては, 引張側コンクリートを考慮しないで各応力度を算定することが安全側の結果となる。このように, 連続合成桁の設計では構造解析時と断面照査時の負曲げ区間の断面剛性の設定方法が重要となる。

#### 3.2 コンクリート床版のひび割れを考慮した設計法

鉄筋コンクリートの引張荷重と鉄筋のひずみの関係の概念図を図4に示す。ひび割れが発生するまでは全断面有効として挙動するが, ひび割れ発生後はコンクリートが有効にならない。しかし, 実際には, コンクリート全断面が無効というわけではなく, ある程度は有効となる。これは, コンクリートにひび割れが生じた後も鉄筋とコ

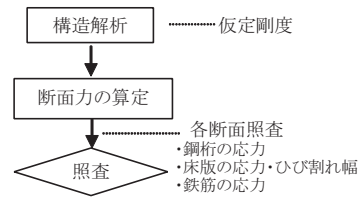


図2 連続合成桁の設計フロー

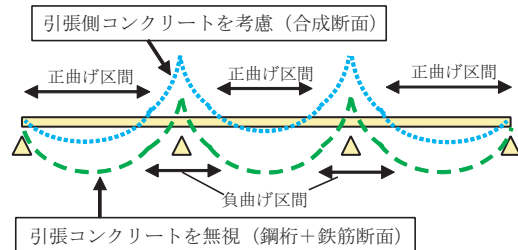


図3 連続合成桁の曲げモーメント分布の概念

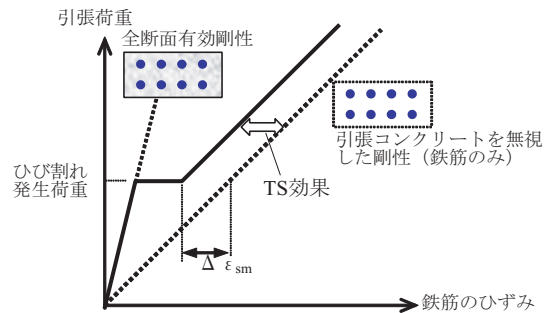
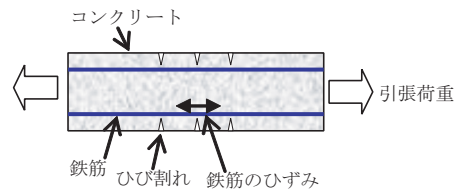


図4 引張力を受ける鉄筋コンクリートの挙動

ンクリート間に付着が効いているためであり, テンションスティフニング効果 (以下, TS効果) とよばれる。TS効果の程度は, コンクリート強度や鉄筋量, 鉄筋とコンクリートの付着の程度に影響を受ける。TS効果による鉄筋の平均ひずみ  $\Delta\epsilon_{sm}$  は, 概念的には, 式(1)により算定される。

$$\Delta\epsilon_{sm} = \beta_m \frac{f_t}{\rho_s \cdot E_s} \quad (1)$$

ここに,

$\beta_m$ : 鉄筋とコンクリートの付着程度を表す係数で, 数値については後述する。

$f_t$ : コンクリートの引張強度

$\rho_s$ : 鉄筋比 (床版断面積に対する鉄筋量の割合)

$E_s$ : 鉄筋のヤング係数

式(1)より, 係数  $\beta_m$  が大きいほど TS効果が大きくなり, 全断面有効剛性に近付くことがわかる。

照査においては, 一般に, 安全側を考えて引張側コンクリートを無視する場合が多い。しかし, ひび割れ後の TS

表2 パターン①～⑦の中間支点部の断面剛性の設定

パターン① 仮定剛性：スパンの15%の部分のコンクリートの剛性を無視する（鋼桁+鉄筋断面）。 断面照査：（鋼桁+鉄筋断面）とする。
パターン② 仮定剛性：ひび割れの有無にかかわらずコンクリートの剛性を考慮する（合成断面）。 断面照査：（鋼桁+鉄筋断面）とする。
パターン③ 仮定剛性：スパンの15%の部分のコンクリートの剛性を無視する（鋼桁+鉄筋断面）。 断面照査： $\beta_m=0.4$ としてテンションスティフニング理論を考慮する。
パターン④ 仮定剛性：スパンの15%の部分のコンクリートの剛性を無視する（鋼桁+鉄筋断面）。 断面照査： $\beta_m=0.2$ としてテンションスティフニング理論を考慮する。
パターン⑤ 仮定剛性：ひび割れの有無にかかわらずコンクリートの剛性を考慮する（合成断面）。ただし、曲げモーメント算出後に10%低減する。 断面照査： $\beta_m=0.2$ としてテンションスティフニング理論を考慮する。
パターン⑥ 仮定剛性：再計算によりひび割れ区間を再設定し、ひび割れ区間のコンクリートの剛性を無視する（鋼桁+鉄筋断面）。 断面照査： $\beta_m=0.2$ としてテンションスティフニング理論を考慮する。
パターン⑦ 仮定剛性：Bode式 <sup>2)</sup> を用いて、テンションスティフニング理論を厳密に考慮する。 断面照査： $\beta_m=0.2$ としてテンションスティフニング理論を考慮する。

効果を考慮すると、実挙動に近い設計が可能となり、図4に示すように同じ荷重に対しても鉄筋のひずみが小さくなるため、より合理的な設計が可能になると考えられる。

#### 4. 試設計の検討内容と条件

##### 4.1 各照査パターンの断面剛性の設定

本検討は、同一の断面に対して数種類の照査手法で設計を行い、照査結果が照査手法によってどの程度変化するかに着目して試設計を行った。

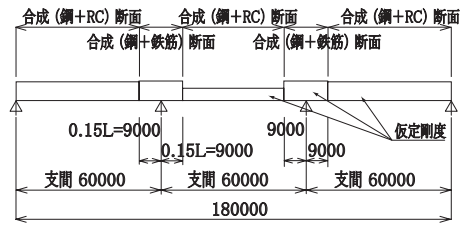
なお、試設計は、基本的に、現行の設計標準<sup>6)</sup>による限界状態設計法で行った。

本検討は、主として、負曲げ区間の断面剛性の取り扱いについて、想定される手法として、表2に示すパターン①～⑦を設定した。パターン③～⑦が、TS効果を考慮した手法である。また、各パターンの構造解析時の仮定剛性を図5に示す。以下、各パターンについて説明する。

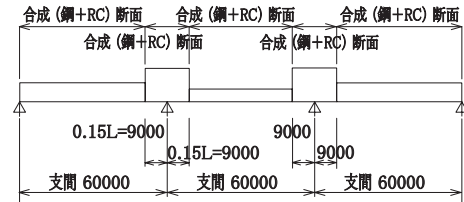
パターン①は、ひび割れが想定される部分については、構造解析時および断面照査時ともにコンクリートの剛性は考慮しない（図5 (a)）。ひび割れ想定区間は各支間の15%とした。この手法は、今までの連続合成桁の設計手法に比較的多く見られる手法である。

パターン②は、ひび割れが想定される部分においても、コンクリートの全断面積の剛性を仮定剛性に考慮するものである（図5 (b)）。この場合、図3に示すように、負曲げ部の曲げモーメントが大きく算定される。また、断面照査時は、負曲げ部には引張コンクリート断面は考慮しない。そのため、本検討ケースの中で最も安全側の結果を与えるものと想定される手法である。本手法は、これまでの鉄道の連続合成桁の設計での適用実績が多い。

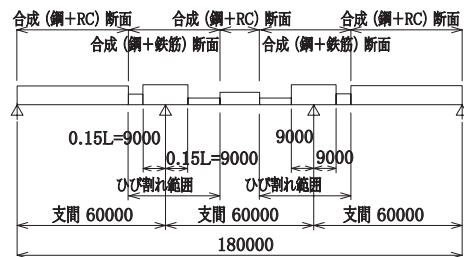
パターン③、④は、断面照査時にのみTS効果を考慮するものである<sup>2)</sup>。式(1)に示すTS効果の大きさを表す



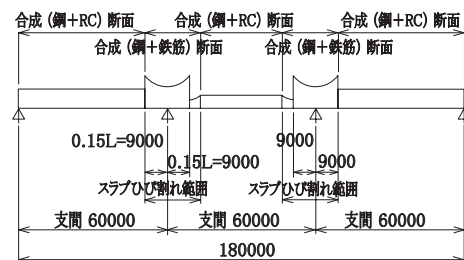
(a)パターン①・③・④



(b)パターン②・⑤

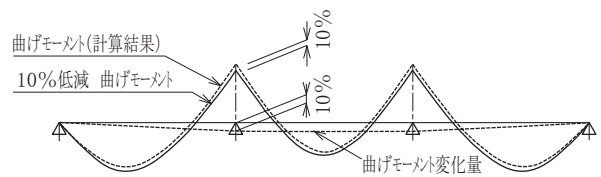


(c)パターン⑥



(d)パターン⑦

図5 各パターンの仮定剛性 (A-model)



(中間支点上の負曲げモーメントを10%低減し、それに合わせて全体の曲げモーメントを変化させる)

図6 パターン⑤の曲げモーメント配分の考え方

係数 $\beta_m$ は、0.4と0.2とし<sup>3)</sup>、それぞれパターン③、パターン④とした。この $\beta_m$ の設定の根拠は、文献1)等より、0.4は静的な荷重実験結果に基づく値、0.2は疲労挙動によるTS効果の低下を考慮した値である。なお、構造解析時の仮定剛性はパターン①と同じである。

パターン⑤は、合成後死荷重、活荷重および衝撃荷重によって中間支点部に生じた最大負曲げモーメントを、ひび割れによる緩和を考慮して10%低減するものとし<sup>2)</sup>、その他の区間の曲げモーメントについてもその低減量に準じて変化させる手法である（図6）。断面照査時は

特集：鋼・合成構造物の設計技術

パターン④と同じである。

パターン⑥は、負曲げモーメント部のひび割れ区間を、支間の15%とせず、パターン①の計算結果に基づいて設定したものである。ただし、負曲げモーメント部のコンクリートの剛性の取り扱いは、パターン①と同じである<sup>2)</sup> (図5 (c))。断面照査時はパターン④と同じである。

パターン⑦は、他の手法よりも厳密にTS効果を用いた設計法に基づき設計する手法である。構造解析は、仮定剛性と、解析結果をもとにTS効果を考慮して算定した断面剛性がほぼ一致するまで収束計算を行う。断面剛性を算定する際のひび割れ後のコンクリートの剛性は、文献2)に基づき、Bodeの提案する式(2)を用いて算定した(図5 (d))。

$$A_{si} = \frac{A_s}{1 - \frac{0.5f_{td}}{\rho_s \cdot \sigma_{sm}}} \quad (2)$$

ここに、 $A_{si}$ ：TS効果を考慮した等価鉄筋断面積（コンクリートの応力分担効果を含む）

$A_s$ ：床版鉄筋断面積

$f_{td}$ ：コンクリートの設計引張強度

$\sigma_{sm}$ ：TS効果を考慮した鉄筋の平均応力

この手法は、断面剛性を設定するまでに数回の構造解析が必要となり、計算量は他の手法よりも多い。そのため、設計実務への適用は難しいが、本手法の結果は最も厳密であると考えられる。

4.2 各照査パターンの不静定力と内部応力の算定

本試設計では、コンクリートのクリープや収縮の影響、コンクリート床版と鋼桁との温度差の影響(±5℃)<sup>6)</sup>を以下のように考慮した(表3)。これらの影響は、連続合成桁が不静定構造であるために生じる不静定力と、断面内のコンクリート床版と鋼桁との相互作用によって生じる内部応力とがあり、この2つに分けて考える。

不静定力の算定は、共役梁理論に基づき、弾性荷重による曲げモーメントを算定してたわみ量を求め、これを強制変位として与えた場合の断面力として算定した。この不静定力の算定は、ひび割れの有無の区間に応じて、表4のように設定した。すなわち、ひび割れが生じる部分には、クリープ・収縮の影響は無くなるものとして考慮していない。なお、不静定力により算出された曲げモーメントは、桁全区間で負曲げモーメントとなることから、負曲げ区間にのみ考慮するものとした(表5)。

内部応力についても、表4、表5に示すように、ひび割れが想定される区間は、クリープ・温度差・収縮の影響は考慮していない。ただし、ひび割れ幅の算出時は、収縮・クリープひずみの影響(150×10<sup>-6</sup>)<sup>7)</sup>を考慮した。

なお、内部応力と不静定力は同じ作用に起因して生じるものであるため、本来は同時に考慮あるいは両方とも

表3 クリープ係数、収縮、温度差の設定

クリープ係数、収縮度等	合成後死荷重	温度差時	収縮時
クリープ係数 $\Phi$	$\Phi 1 = 2.0$	-	$\Phi 2 = 3.0$
温度差及び収縮度	-	$\Delta t = \pm 5^\circ C$	$\epsilon_s' = 200 \times 10^{-6}$

表4 不静定力算出時の弾性荷重の有無について

	ひび割れ区間			非ひび割れ区間		
	クリープ	収縮	温度差	クリープ	収縮	温度差
パターン①～⑦	考慮しない	考慮しない	考慮する	考慮する	考慮する	考慮する

表5 不静定力・内部応力の効果の考慮方法

	ひび割れ区間		非ひび割れ区間	
	不静定力	内部応力	不静定力	内部応力
パターン①～⑦	考慮する	考慮しない	考慮しない	考慮する

非ひび割れ区間：正曲げモーメント区間および負曲げモーメント区間でひび割れが生じない区間

考慮しないのがよいと考えられるが、本検討では、設計実務で適用実績の多い上記の方法を採用することとした。

5. 試設計結果

5.1 曲げモーメント算出結果

A-model, B-modelの曲げモーメントの計算結果を図7、図8に示す。曲げモーメントは合成前死荷重(鋼桁断面使用)のものと、合成後死荷重+活荷重のものに分けて表示し、各値はパターン①の合計値に対する比率で示した。合成前死荷重による曲げモーメントは、全てのパターンで鋼桁のみの断面剛性で算定しているため、同じ値となっている。

図7(A-model)における、端径間正曲げ最大の位置の計算結果では、各パターンともに1～2%程度の差であり、ほぼ同値といえる。しかし、中間支点部(負曲げ最大位置)では、パターン②の合成後死荷重+活荷重の曲げモーメントが大きな値となっており、合計の値では5%程度の差が生じている。これは、中間支点部のコンクリート剛性の考慮の有無によって生じている(図3)。中間支点部の合計値におけるそのほかの計算パターンでは、ほぼパターン①と同様になっている。第二径間正曲げ最大の位置の比較では、中間支点部と逆の傾向となっている。これも、図3に示すような、ひび割れ想定区間のコンクリートの剛性の考慮方法の差と考えられる。

図8(B-model)においても、図7とほぼ同様な傾向となっているものの、パターン①との比率は多少の変化がある。つまり、中間支点部ではA-modelとB-modelでほぼ同値となっているが、端径間正曲げ最大の位置では、A-modelよりもB-modelのほうが各パターンの差が大きく、逆に第二径間正曲げ最大の位置では、A-modelよりもB-modelのほうが各パターンの差が小さくなる傾向となっている。これは、図7、図8より、合成前死荷重と合成後死荷重+活荷重の比率の変化が大きいためといえる。

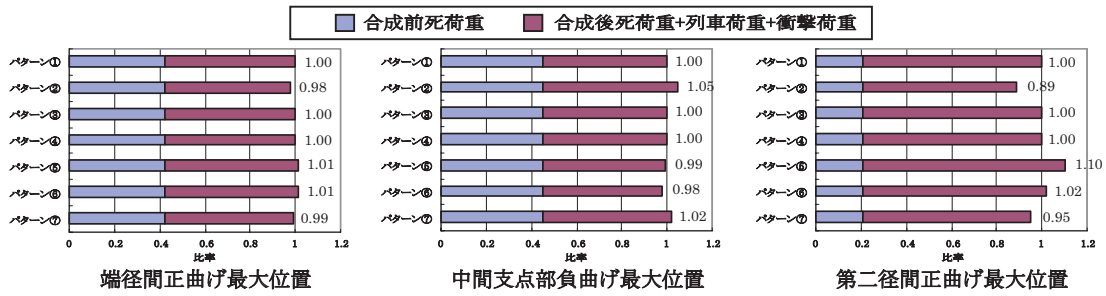


図7 各パターンの曲げモーメント算出結果 (A-modelの場合・パターン①の合計を基準値1とするときの比率)

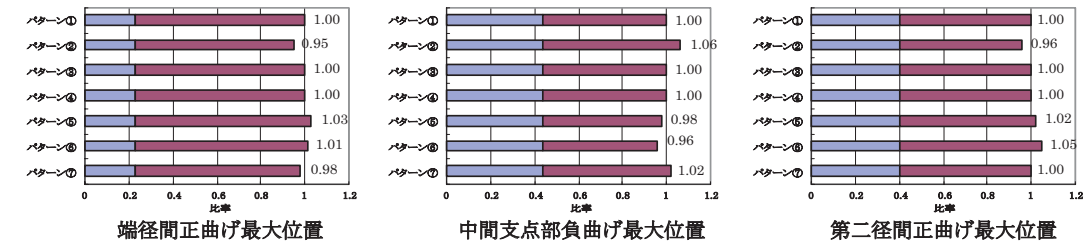


図8 各パターンの曲げモーメント算出結果 (B-modelの場合・パターン①の合計を基準値1とするときの比率)

5.2 応力度・ひび割れ幅の算出結果

図9および図10は、A-modelおよびB-modelにおける負曲げモーメントを受ける中間支点上の断面の各パターンの応力度とひび割れ幅の算出結果を示している。図11には、これらの着目点を示している。

図9および図10はパターン①の合計値を基準とした外力・内力・テンションスティフニングの影響の割合を示している。ここで、

- 外力：合成前死荷重, 合成後死荷重, 列車荷重, 衝撃荷重
- 内力：不静定力, 内部応力

TS：テンションスティフニングの影響を表している。

図9 (a) の中間支点部の鉄筋の応力度より、パターン②はひび割れ想定区間のコンクリートの剛性を考慮した影響で、パターン①より8%大きい応力度となっている。パターン③においては、外力・内力はパターン①とほぼ同等であるが、テンションスティフニングの影響によってパターン①よりも15%大きな値となった。なお、ここで示した鉄筋の応力度は、ひび割れ部に生じる最大応力度を用いたため、テンションスティフニングの影響は、鉄筋の応力度を大きくする方向に作用している。パターン③では、テンションスティフニングの影響の度合いを比較するために $\beta_m = 0.4$ を用いているが、疲労による影響を考えると、パターン④~⑦の $\beta_m = 0.2$ とするのがよい。結果として、パターン④・⑤・⑦は、パターン①よりも6~7%程度大きくなっており、最も安全側の設計となるパターン②と同程度の結果となった。パターン⑥においては、TS理論を考慮した他の計算パターンよりも小さな結果となったが、これは、外力・内力とも小さく計算されているため、結果としては①と同程度となっている。TS効果を厳密に考慮したパターン⑦が実挙動に最も近い

と考えれば、パターン④・⑤はほぼ同等の結果である。

図9 (b) は中間支点部に生じる床版コンクリートのひび割れ幅の計算結果を比較したものである。パターン②は、パターン①に比べて5%程度大きくなっているが、パターン①・②において内力(不静定力と内部応力)がほぼ等しいことから、外力の差がそのまま現れている。この外力の差は、ひび割れ想定区間のコンクリートの剛性の考慮の有無によるものである。パターン③~⑦は、テンションスティフニングの影響を考慮しているが、この効果は負の値であり、ひび割れ幅は小さくなっている。これは、ひび割れ幅算出時においては、鉄筋の平均ひずみを用いているためであり、結果として各パターンの計算結果はパターン①よりも7~15%小さくなっている。特に、パターン⑥については、図9 (a)と同様に、計算値は最も小さい。

図9 (c) は、中間支点部鋼桁(主桁)の下フランジの計算結果を比較したものである。各計算結果は、図9 (a), (b)に比べてパターン間の差は小さい。しかし、全体的な傾向として、パターン①よりパターン②が大きく、全てのケースの中で最も安全側の設計となり、パターン⑥が小さいこと、また実挙動に最も近いパターン⑦とパターン④がほぼ同等の結果となっていることは、図9 (a), (b)と同様の傾向である。図9 (c)より、鋼桁下フランジの応力度におけるテンションスティフニングの影響は小さいことがわかる。

また、図10のB-modelの計算結果は、基本的にはA-modelと同様の傾向を示している。したがって、B-modelの-span割りの程度なら、各パターンの計算結果は-span割にはさほど影響されないということがわかった。

以上より、パターン②が最も安全側の照査結果となるので、現状では標準的な手法と考えられる。また、TS効果を考慮したパターン④も適用可能であると考えられる。

特集：鋼・合成構造物の設計技術

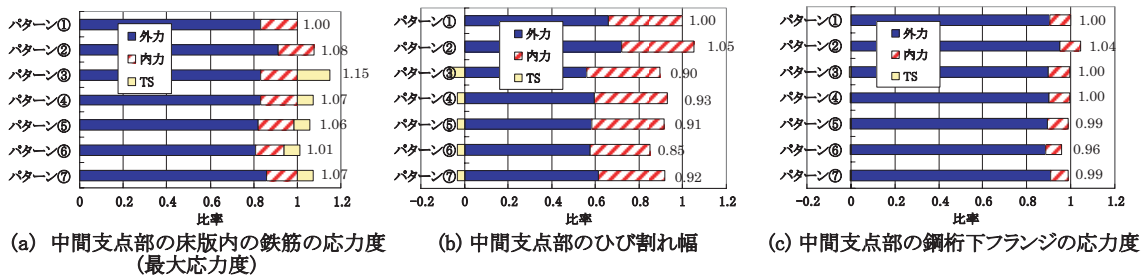


図9 各パターンの応力度・ひび割れ幅算出結果 (A-modelの場合・パターン①の合計を基準値1とするときの比率)

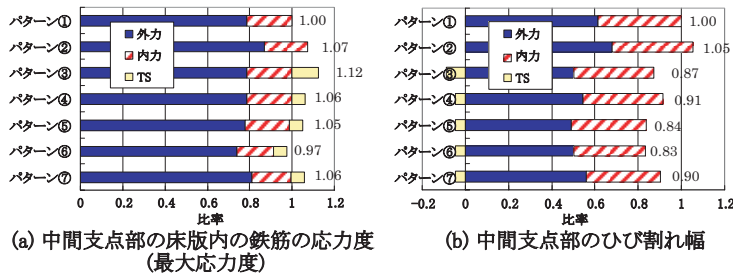


図10 各パターンの応力度・ひび割れ幅算出結果 (B-modelの場合・パターン①の合計を基準値1とするときの比率)

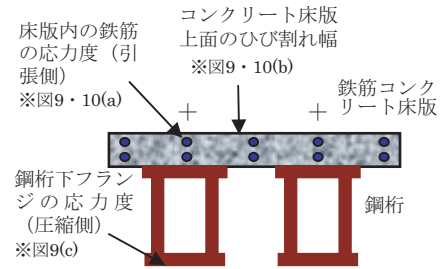


図11 中間支点上の断面における照査の着目点

5.3 試設計結果のまとめ

試設計の結果より得られた結論を以下に示す。

- (1) ひび割れ区間の設計において、構造解析時はコンクリートの剛性をすべて考慮する手法 (パターン②) は、中間支点部では応力度・ひび割れ幅が4~8%程度大きめに算定された。そのため、中間支点部の照査においては、この手法を用いることにより最も安全側の結果を与える。
- (2) テンションスティフニング効果を設計に取り入れた場合、ひび割れ幅は小さめに算定される。そのため、ひび割れ幅により断面が決定されるケースでは、合理化を図れる可能性がある。ただし、鋼桁の応力度にはあまり影響を及ぼさず、床版内の鉄筋の応力度は大きくなる傾向がある。
- (3) テンションスティフニングを適用した設計手法に関しては、合理化を目的として適用する場合、本論文に示したパターン④は、テンションスティフニング効果を厳密に考慮したパターン⑦と同程度の結果であり、設計作業も煩雑でなく、適用可能と考えられる。

6. まとめ

本論文では、支間割りの異なる2ケースの連続合成桁を対象に試設計を行い、各設計法の傾向の調査・検討を行った。その結果、新設計標準における連続合成桁の負曲げ区間の設計法としては、コンクリートの剛性をすべて考慮するパターン②の手法が最も安全側の評価となるため、現状では標準的な手法とするのが良いと考えられる。ただし、コンクリート床版のひび割れを考慮したパターン

④の手法も実設計への適用が十分可能と考えられる。

謝辞

本検討は、国土交通省からの委託を受けて実施した「鉄道技術基準整備のための調査研究」の一環として行ったものである。ここに記して謝意を表す。

文献

- 1) 谷口望, 池田学, 市川篤司, 碓山晴久, 依田照彦: 連続合成桁の中間支点部のひび割れ制御, 鉄道総研報告Vol. 19, No.3, 2005
- 2) 栗田章光, 大山理, マーカス ルートナー: 二重合成連続箱桁橋の現状と課題, 第4回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, 土木学会, pp.45-58, 2001
- 3) 長井正嗣, 奥井義昭, 岩崎英治: 連続合成桁の初期ひび割れ状態を考慮したひび割れ幅, 鉄筋応力度算定法の一提案, 土木学会論文集No.759/ I -67, pp.283-292, 2004
- 4) 谷口望, 相原修司, 池田学, 八巻康博, 藤原良憲, 鈴木喜弥, 木下哲龍: 連続合成桁における中間支点部の活荷重応答に関する実橋測定, 構造工学論文集 Vol.51A, 土木学会, pp.1449-1457, 2005
- 5) 谷口望, 池田学, 依田照彦: 鉄道用連続合成桁の設計におけるテンションスティフニングの影響評価, 構造工学論文集 Vol.52A, 土木学会, pp.1047-1055, 2006
- 6) 国土交通省 (監修), (財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物, 丸善, 2000
- 7) 国土交通省 (監修), (財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼とコンクリートの複合構造物, 丸善, 2002